Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 35, 4, 2023. (47-62)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Experimental Study of Measurement of Free Oscillations of a Cylinder with Fin in Wind Tunnel Under Different Reynolds

Research Article

Hayatollah Adavi[1], Hassan Isvand[2], Arash Shams Taleghani[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.80578.1157

1. Introduction

In the field of aerospace technologies, the study of unsteady flow around bodies and surfaces undergoing rotation or oscillation (such as antennas, rotors, and bodies with tails) is of particular importance. Numerical modeling of turbulent flow is complicated and experimental and laboratory methods are often used. When the flow hits a body, the flow layer separates from the sharp edges of the surfaces and creates vortex regions. These regions create a pressure distribution around the body, which generates forces perpendicular to the surfaces and results in a moment around the center. Based on the resulting moment and the moment of inertia of the body, the possibility of movement around the cylinder axis exists. As a result, the body's movement is also affected by the flow, ultimately leading to oscillatory, rotational, or a combination of both types of movements. The study of the dynamic behavior of composite bodies such as a cylinder with the fin of motion behavior of a composite body (cylinders with fin) is very important for designing and maintaining the stability of rockets and missiles.

2. Laboratory equipment

The desired laboratory models are cylinders with lengths of 16 and 24 centimeters and a diameter of 10 centimeters made of Plexiglass. Figure 1 shows a schematic of the desired model with its geometric parameters and Figure 2 shows a schematic of the aforementioned model with an electronic angle measuring device.

3. Results

Multiple experiments were performed on cylinders with lengths of 16 and 24 centimeters at different length ratios, Reynolds numbers, and initial angles of attack. In all experiments, a model with four different motion behaviors, including unsteady oscillation, steady oscillation, unsteady rotation, and steady rotation was used.

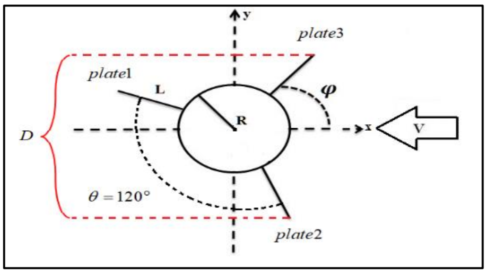


Figure 1. Schematic of the model under study along with its geometric parameters.

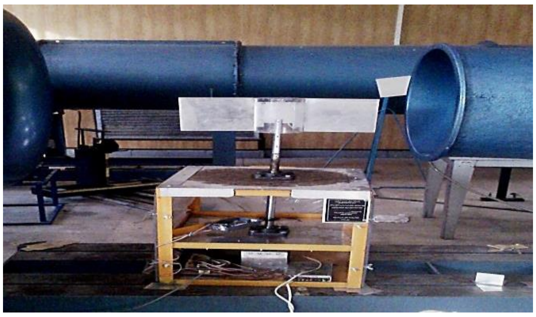


Figure 2. The model and equipment used in the wind tunnel

Figure 3 shows the variations in the angular motion of the cylinder over time for a 16-centimeter-long cylinder at different Reynolds numbers. As can be seen, at low Reynolds numbers, due to the low velocity of the flow, a small force is applied to the cylinder, causing the model to oscillate in one or more modes and become damped. However, as the Reynolds number increases, the incoming flow velocity and the force applied to the cylinder also increase, and the motion behavior of the model changes from unsteady oscillation to steady oscillation. As long as the flow remains steady, the model oscillates uniformly. In

*Manuscript received. March 9, 2023. Revised, July 11, 2023, Accepted, November 5, 2023.

[1]. PhD Candidate, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

[2]. Associate Professor, Shahid Sattari Aeronautical University, Tehran, Iran

[3]. Corresponding author. Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran. **Email**: Arash.taleghani@gmail.com

other words, it can be said that at a certain angle of attack and with a certain cylinder, at a steady oscillation motion, increasing the velocity or changing the angle of attack or cylinder, the motion behavior of the model changes from unsteady to steady oscillation, and it will no longer be damped. Figure 4 shows the results for a 24-centimeter-long cylinder at length ratios of 3 and 4. As can be seen, as the Reynolds number increases, the Strouhal number also increases and reaches a constant value at high Reynolds numbers. The average Strouhal number for a length ratio of 3 is 0.577, and for a length ratio of 4, the average Strouhal number is 0.530.

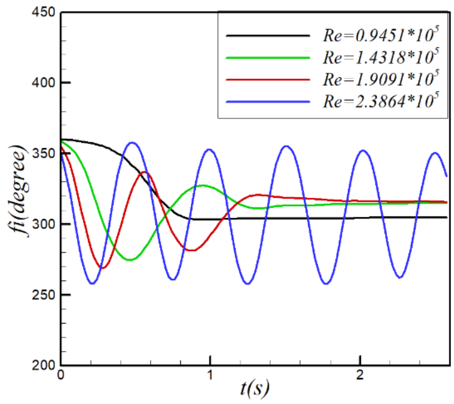


Figure 3. Variation of body angle over time for a 16-centimeter cylinder with an aspect ratio of 1 and a zero-degree angle of attack at different Reynolds numbers

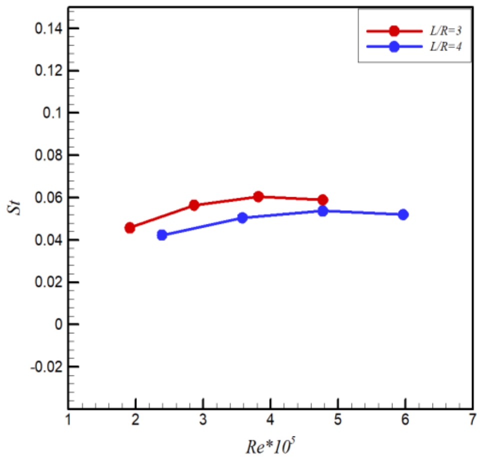


Figure 4. Variation of the Strouhal number with Reynolds number for a 24-centimeter cylinder

4. Conclusion

The laboratory experiment results indicated that at a constant longitudinal ratio and Reynolds number, the occurrence of steady-state rotational motion regime is close to zero at initial angles of attack near zero, and with an increase in the initial angle of attack, the motion of the model will be in the form of steady oscillation. The results demonstrated that rotational, oscillatory, and combined motion behaviors occur, which depend on the geometric specifications of the model such as longitudinal ratio, angle of attack, and free stream velocity. For a constant longitudinal ratio and Reynolds number, the occurrence of steady rotation behavior is close to zero initial angles of attack, and as the initial angle of attack increases, the motion behavior of the model becomes steady oscillation. For a low aspect ratio and low velocity, the motion pattern becomes oscillatory around an angle of 60 degrees and is transformed into a rotational motion pattern with an increase in longitudinal ratio and free stream velocity. The highest amplitude of oscillation or rotation is usually associated with a zero initial angle of attack. Generally, the occurrence of a rotational motion pattern happens with an increase in longitudinal ratio and free stream velocity at low initial angles of attack. The angular velocity of the models and the Strouhal number in the rotational motion pattern were calculated. The results showed that the Strouhal number has a constant value with an increase in the Reynolds number.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

مطالعه تجربی اندازه‌گیری نوسانات آزاد یک سیلندر همراه با بالک در تونل باد تحت رینولدزهای مختلف*

مقاله پژوهشی

حیات اله اداوی[۱] حسن عیسوند[۲] سید آرش سید شمس طالقانی[۳]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.80578.1157

چکیده در این تحقیق به بررسی رفتار یک استوانه با سه بالک تحت جریان آزاد هوا پرداخته شده است. هدف از این تحقیق مطالعه جریان ناپایای آیرودینامیکی با توجه به اهمیت کاربردی در مسایل هوانوردی است. به دلیل وجود درجه آزادی حرکتی در هندسه موجود و پیچیدگی توده‌های گردابه‌ای که سبب ناپایایی است، پیش‌بینی صحیح رفتارهای دینامیکی مختلف دارای اهمیت است. رفتار دینامیکی این مدل با تغییرات نسبت طولی، سرعت جریان آزاد و زوایای حمله مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که رفتارهای حرکتی دورانی و نوسانی و ترکیبی از آن‌ها رخ می‌دهد که به مشخصات هندسی مدل از جمله نسبت طول صفحات به شعاع استوانه، زاویه حمله و سرعت جریان آزاد بستگی دارد. در نسبت طولی کم و سرعت پایین، الگوی حرکتی حول زاویه ۶۰ درجه میرا می‌شود و رژیم حرکتی از نوع نوسانی است که با افزایش نسبت طولی و سرعت جریان آزاد، به رژیم حرکتی دورانی تغییر پیدا می‌کند. بیشترین نوسان و یا دوران مربوط به زاویه حمله اولیه صفر درجه است. عموما وقوع رژیم حرکتی دورانی با افزایش نسبت طولی و سرعت جریان آزاد در زوایای حمله اولیه پایین اتفاق می‌افتد. سرعت زاویه‌ای مدل‌ها و عدد اشتروهال در رژیم حرکتی دورانی محاسبه شد و نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز جریان، عدد اشتروهال دارای مقدار ثابتی است.

واژه‌های کلیدی جریان ناپایا، حرکت نوسانی و دورانی، عدد رینولدز، عدد اشتروهال.

Experimental Study of Measurement of Free Oscillations of a Cylinder with Fin in Wind Tunnel under Different Reynolds

Hayatollah Adavi Hassan Isvand Arash Shams Taleghani

Abstract *The purpose of this study is to investigate the behavior of a cylinder with three fins in the presence of free air flow. This study aims to investigate the unsteady aerodynamic flow with respect to its practical significance in aviation. Considering the degree of freedom of movement within the geometry and the complexity of the vortex masses that cause instability, it is essential to accurately predict the different dynamic behaviors. We have investigated the dynamic behavior of the model with different length ratios, free flow speeds, and angles of attack. According to the results of the study, rotational and oscillating behaviors, as well as a combination of both, are observed, and they are dependent upon the geometrical characteristics of the model, such as the ratio of the length of the plates to the radius of the cylinder, as well as the angle of attack When the aspect ratio and free flow speed are low, the motion pattern is damped around 60 degrees and the motion regime is oscillatory in nature, which changes to rotational motion as the aspect ratio and flow speed increase. The maximum oscillation or rotation is related to the initial angle of attack of zero degrees. It has been observed that rotational motion regimes occur with an increase in the longitudinal ratio and free flow speed at low initial angles of attack. The angular velocity of the models and the Strouhal number in the rotational motion regime have been calculated and the results show that with the increase of the Reynolds number, the Strouhal number has a constant value.*

Key Words Unsteady flow, Oscillatory and rotational movements, Reynolds number, Strouhal number.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۲/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۸/۱۴ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، پژوهشکده هوایی، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

(۲) دانشیار، گروه هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

(۳) نویسنده مسئول، استادیار، پژوهشکده هوایی، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران.

Email: Arash.taleghani@gmail.com

مقدمه

در حوزه فناوری‌های هوافضایی مطالعه جریان ناپایا حول اجسام و صفحات در حال چرخش یا نوسان (آنتن‌ها، فرفره‌ها، اجسام دارای دم) از اهمیت خاصی برخوردار است. به‌منظور تأمین الزامات عملکردی این‌گونه وسایل لازم است رفتار آن‌ها تحت درجات آزادی مختلف با مشخصات هندسی گوناگون به دقت پیش‌بینی گردد. فنگز در سال ۱۹۶۸ آزمایش‌هایی را بر روی استوانه تحت نوسانات آزاد در تونل باد (مقطع آزمون D شکل) انجام داده است. در این آزمایش‌ها استوانه به وسیله چندین فنر پیچشی به بدنه محل آزمایش متصل شده است [1]. آماندولس در سال ۲۰۱۰ آزمایش‌های مشابهی را بر روی استوانه با مقطع مربعی در تونل باد انجام داده است [2]. آممورا و همکارانش در آزمایش‌هایی مشاهده کردند که فاکتور میرایی آیرودینامیکی برای یک استوانه تحت نوسانات آزاد به‌صورت یک نیروی میرایی منفی در عدد اشتروهال ۰/۲ دیده می‌شود [3]. سارپکایا در سال‌های ۱۹۷۹ و ۲۰۰۴ دیدگاه متفاوتی را برای نوسانات خود القا شده جسم مطرح کرده است. او بیان کرد زمانی که پدیده همزمانی یا قفل شدن (lock in) رخ می‌دهد فرکانس رهایی گردابه‌ها و فرکانس نوسانات جسم به سمت فرکانس واحدی میل کرده و یا به عبارتی در فرکانس طبیعی جسم بسته یا یکی می‌شوند [4,5]. زمانی که فرکانس رهایی گردابه‌ها با فرکانس طبیعی جسم برابر شود و به عبارتی هر دو فرکانس مقدار یکسانی داشته باشند، این پدیده اتفاق می‌افتد و دامنه نوسانات جسم قرار گرفته در جریان افزایش می‌یابد. ویژگی نوسانات خود القا شده اجسام که توسط آممورا مطرح شده بود مورد توجه اسکالان و روزنبوم قرار گرفته است [6]. ریزش گردابه اطراف استوانه مدوله شده براساس چگالی محیط توسط ژنهوا در سال ۲۰۲۲ بررسی شده است. او نشان داد که فرکانس ریزش گردابه، که به‌صورت عدد اشتروهال بی‌بعد بیان می‌شود، به عدد رینولدز بستگی دارد [7]. ارتعاش ناشی از جریان یک صفحه شکاف انعطاف‌پذیر متصل به یک استوانه مربعی در جریان آرام با استفاده از شبیه‌سازی تعامل دو طرفه ساختار سیال توسط بین خو و همکارانش در سال ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفته است [8]. نیروها و ارتعاشات ناشی از جریان ممکن است به‌طور جدی بر عمر و ایمنی خستگی سازه تأثیر بگذارند [9,10]. با این حال، ارتعاشات ممکن است مفید نیز باشند، زیرا می‌توانند به‌عنوان یک منبع انرژی پاک و پایدار عمل کنند [11,12]. جریان عبوری از روی یک استوانه مدور در مکانیک سیالات توسط جعفری و همکارانش [13] و خو و همکارانش در سال ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفته است [14]. یانگ خوبا و همکارانش در سال ۲۰۲۲ نشان دادند که برای ارتعاشات ناشی از جریان یک استوانه دوار دو درجه آزادی با افزایش سرعت چرخش و کاهش سرعت، ساختار گردابه از الگوی 2S به الگوهای P+S، T+S، P+T و 2P و در نهایت به الگوی2T تغییر پیدا می‌کند [15]. مد 2S شامل دو گردابه منفرد در هر سیکل حرکتی و مد 2P شامل دو جفت گردابه در هر سیکل حرکتی است. مد P+S شامل یک گردابه مجزا و یک جفت گردابه در یک سیکل حرکتی است. مد T شامل یک گردابه ۳ تایی در هر سیکل حرکتی می‌شود. شبیه‌سازی جریان حفره حول یک استوانه مدور نوسانی با توسعه یک روش عددی کارامد توسط سئونجینگ در سال ۲۰۲۱ مطرح شد [16]. تأثیر انتقال حرارت و چرخش سیلندر بر نیروهای القایی ناشی از ریزش گردابه به‌صورت عددی توسط آسما علی و همکارانش [17] در سال ۲۰۲۲ بررسی شده است. مطالعات آن‌ها نشان داد خیابان گردابه‌ای کارمن با الگوی ریزش گردابه 2S در اکثر موارد مشاهده می‌شود. ویلیامسون و همکارانش دریافتند که تولید، توسعه و اثر متقابل لایه‌های گردابه‌های آزاد از معضلات بسیاری از جریان‌های آیرودینامیکی حول بال‌ها، اجسام غیر آیرودینامیکی و اجزای آن‌هاست. بال‌های با زاویه پسگرایی بالا و لبه‌های تیز، اجسام نازک و پیکره‌هایی با هندسه پیچیده در زوایای حمله نسبتا بالا، دارای میدان جریان گردابه‌ای پیچیده‌ای حول جسم و همچنین دنباله آن می‌باشند [18,19]. مسئله مدل‌سازی جریان‌های گردابه‌ای بسیاری از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. در این حالت کاربرد مستقیم روش‌های مدل‌سازی عددی بسیار مشکل است و غالبا از روش‌های تجربی و آزمایشگاهی استفاده می‌شود. وقتی که جریان به جسم برخورد می‌نماید، از لبه تیز صفحات لایه جریان جدا و نواحی گردابه‌ای ایجاد می‌شود. این نواحی، توزیع فشاری را اطراف جسم ایجاد می‌نماید که باعث تولید نیروهایی عمود بر صفحات و به واسطه آن گشتاوری

حول مرکز می‌شود. با توجه به مقدار گشتاور حاصله و ممان اینرسی جسم، امکان حرکت حول محور استوانه وجود دارد. با توجه به آن، حرکت خود جسم نیز جریان را تحت تأثیر قرار داده و اندرکنشی بین جسم و جریان ایجاد خواهد شد که نهایتا منجر به بروز حرکت‌های نوسانی، دورانی و یا ترکیبی از آن‌ها خواهد شد. با توجه به مطالعات مرور شده و وجود تحقیقات تجربی اندک در خصوص مطالعه رفتار دینامیکی اجسام مرکب نظیر سیلندر همراه با بالک که کاربردهای متعددی در صنعت هوایی دارد (به‌طور نمونه می‌توان به راکت‌های کاوش یا موشک‌های نظامی اشاره کرد)، تحقیق حاضر به مطالعه رفتار دینامیکی این هندسه مرکب می‌پردازد. به همین منظور در راستای نیل به اهداف این پژوهش، برای شناخت و پیش‌بینی رفتارهای جسم در موقعیت‌های متفاوت علاوه بر مطالعه و رصد یافته‌های علمی، تجهیزات آزمایشگاهی مناسبی نیز مورد نیاز می‌باشد. در همین خصوص جهت انجام این پژوهش و تحقیق‌های مرتبط، برای اولین بار در کشور دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی توسط نویسندگان ساخته شده است و این پژوهش شناخت دقیقی از رفتار حرکتی جسم مرکب (استوانه با بالک) را ارائه می‌دهد که در خصوص طراحی و تعادل پایداری موشک‌ها و راکت‌های اشاره شده بسیار حائز اهمیت است.

تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات مورد نیاز برای انجام این تحقیق عبارتند از مدل آزمایشگاهی، تونل باد مادون صوت و دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی. کلیه آزمایش‌ها، در تونل باد انجام شده است. این تونل باد، مادون صوت و از نوع مدار بسته با مقطع آزمون باز می‌باشد که قابلیت وزش باد تا حداکثر سرعت ۵۰ متر بر ثانیه را دارا است. مقطع آزمون این تونل باد دارای ابعادی به طول ۸۰ سانتی‌متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۱- الف).

مدل‌های آزمایشگاهی مورد نظر، استوانه‌هایی به طول ۱۶ و ۲۴ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر و از جنس پلکسی گلاس می‌باشند. دلیل استفاده از جنس پلکسی گلاس، وزن سبک و داشتن سطحی صاف و صیقلی بودن آن است. بر روی بدنه استوانه و در راستای طولی شیارهایی با ضخامت ۲ میلی‌متر جهت اتصال ایجاد شده است (شکل ۱- ب). بالک‌ها دارای عرض‌های مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر با طول ۱۶ و ۲۴ سانتی‌متر می‌باشند. نمایی از بالک‌ها با طول ۱۶ سانتی‌متر در (شکل ۱- ج)دیده می‌شود. به دلیل حساسیت بالایی که برای این آزمایش نیاز بود، این شیارها توسط لیزر صنعتی ایجاد شده است. در صورت عدم دقت کافی جهت ایجاد شیارها، بالکی که از این شیارها عبور نموده و به محور مرکزی متصل می‌شود دچار لقی شده و باعث می‌شود مدل در همه سرعت‌ها مخصوصا سرعت بالای ۱۵ متر بر ثانیه شروع به لرزش نماید و علاوه بر تولید اغتشاش در حین آزمایش، در نهایت منجر به شکستن مدل شود. برای اتصال بالک به مدل، یک محور مرکزی از جنس آلومینیوم با سه تیغه ۳ سانتی‌متری، که با زاویه ۱۲۰درجه به محور متصل شده، ساخته شده است و صفحات از داخل شیارها به تیغه‌های محور مرکزی با پیچ متصل شده‌اند (شکل ۱- د). شماتیک مدل مورد نظر با پارامترهای هندسی آن در (شکل ۲) نشان داده شده است.

plate1، plate2، plate3 بالک‌های متصل به استوانه می‌باشد که عرض آن با L مشخص شده و R شعاع استوانه در نظر گرفته شده است. D طول مشخصه جسم می‌باشد. برای محاسبه عدد اشتروهال، فرکانس کاهیده و عدد رینولدز، طول مشخصه جسم به‌عنوان طول مرجع در نظر گرفته شده است. منظور از نسبت طولی بیان شده (L/R) همان عرض بالک‌ها به شعاع استوانه است که در هر دو استوانه ۱۶ و ۲۴ سانتی‌متر شعاع برابر با ۵ سانتی‌متر می‌باشد. بالک‌ها دارای عرض‌های مختلفی به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد که با تقسیم نمودن به شعاع استوانه، نسبت‌های طولی به ترتیب ۱، ۲، ۳ و ۴ به‌دست می‌آید.

$$D = P_1 + P_2\cos\varphi_2 \quad (۱)$$

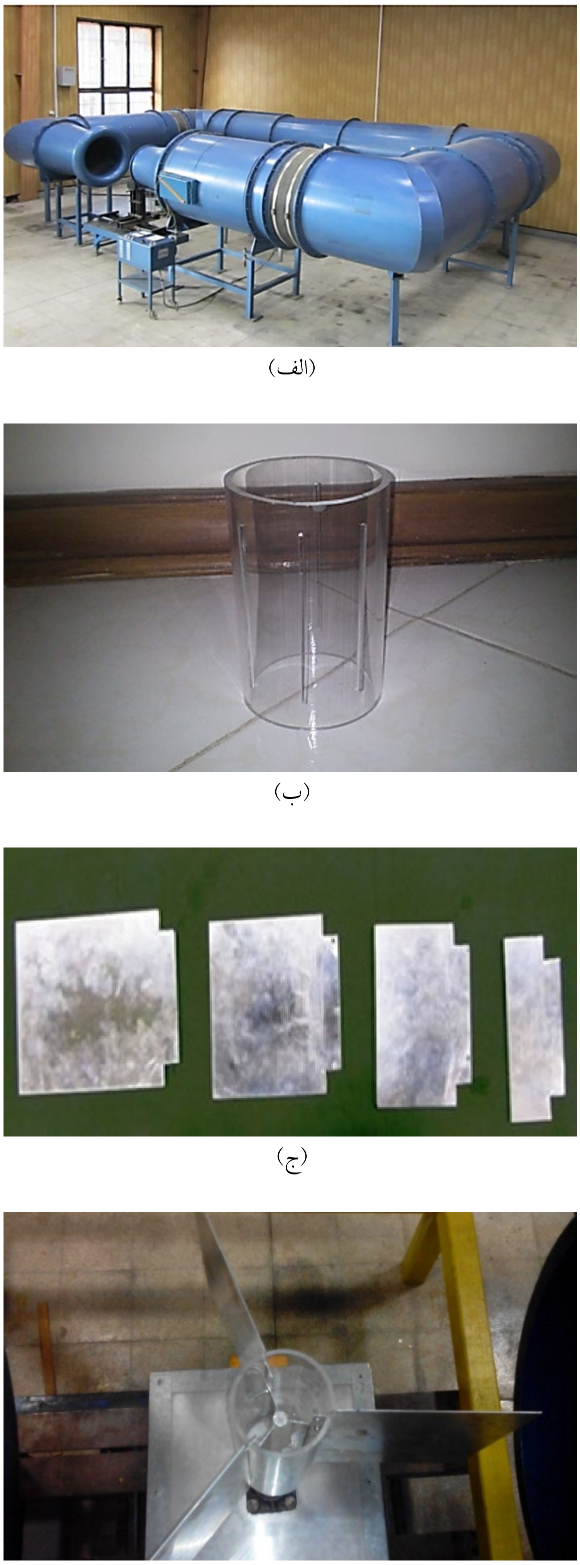
در جایی که

$$P_1 = L + R$$

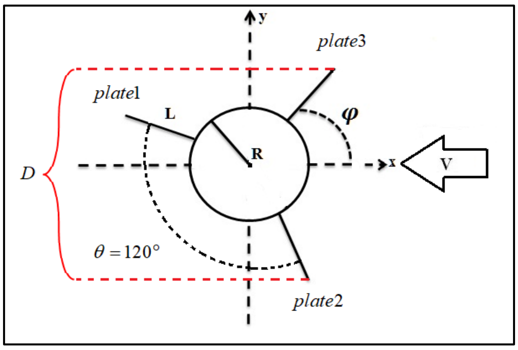
$$P_2 = L + R$$

با جای‌گذاری روابط ففوق، طول مشخصه از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

$$D = (L + R)(1 + \cos\varphi_2) \quad (۲)$$

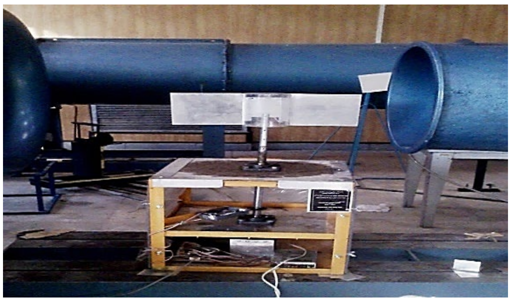


شکل ۱ (الف) نمایی از تونل باد مادون صوت، (ب) استوانه‌های شیاردار از جنس پلکسی گلاس به کار رفته در آزمایش، (ج) نمایی از صفحات به کار برده شده در آزمایش، (د) مدل استوانه به همراه سه صفحه به طول ۲۴ سانتی‌متر و نسبت L/R برابر با ۴



شکل ۲ شماتیک مدل مورد مطالعه به همراه پارامترهای هندسی آن

دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی، باید قابلیت نگه داشتن مدل (استوانه به همراه صفحات) با درجه آزادی چرخش را در جریان تونل باد داشته باشد و همچنین باید بتواند رفتار مدل را (نوسان یا دوران) طی یک پروسه معین جهت بررسی و ثبت نتایج به رایانه منتقل نماید. از این رو این دستگاه از دو بخش الکترونیکی و مکانیکی تشکیل شده است. بخش مکانیکی وظیفه نگه داشتن مدل با درجه آزادی چرخش و انتقال رفتار آن را داشته و قسمت الکترونیکی وظیفه تبدیل رفتار و جابه‌جایی مدل از حالت مکانیکی به الکترونیکی و انتقال داده‌ها را به رایانه دارد. در نهایت داده‌ها در رایانه مورد آنالیز قرار گرفت. نمایی از شماتیک مدل مذکور با دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی در (شکل۳) دیده می‌شود.



شکل ۳ مدل و تجهیزات به کار رفته در تونل باد

پس از آن‌که صفحات بر روی استوانه نصب شد، مدل مذکور به همراه دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی در مقطع آزمون تونل قرار داده شد. دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی شامل ترمزگیر مخصوصی بوده که می‌توان توسط آن مدل را در زوایای حمله اولیه مد نظر قرار داده و در جریان ثابت نگه داشت. برای انتقال داده‌ها به رایانه از پورت سریال استفاده و همچنین به‌منظور ثبت

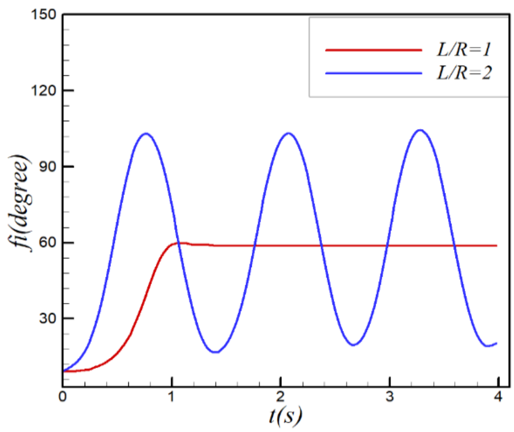
داده‌ها و آنالیز آن‌ها در رایانه از برنامه لب‌ویو (LabView) استفاده می‌شود. این برنامه نوعی زبان برنامه‌نویسی گرافیکی است که با نوشتن برنامه‌ای در آن می‌توان داده‌ها را از پورت سریال خوانده و در رایانه ثبت نمود.

بدین منظور با اجرای برنامه مذکور در نرم‌افزار لب ویو، ابتدا سیگنالی جهت آزاد شدن ترمزگیر به میکروکنترلر فرستاده می‌شود و سپس مدل در جریان شروع به حرکت کرده و تغییرات حرکتی آن با توجه به گام زمانی که در برنامه قرار داده شده، ثبت می‌شود. این گام زمانی برابر با ۰/۰۲ ثانیه است. بدین ترتیب در رینولدزهای مختلف، زوایای حمله اولیه (۰، ۸، ۱۶، ۲۴ و۳۲ درجه) و نسبت‌های طولی مختلف (عرض صفحه به شعاع استوانه (L/R) برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ تغییرات زوایا ثبت می‌شود.

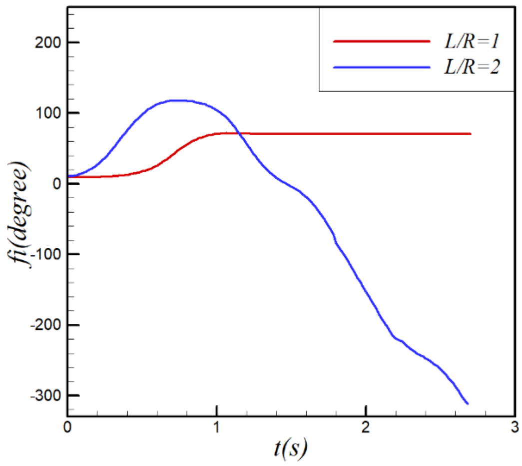
نتایج

در این تحقیق آزمایش‌های متعددی بر روی استوانه‌ها با طول ۱۶ و ۲۴ سانتی‌متر در نسبت‌های طولی، اعداد رینولدز متفاوت و زوایای حمله اولیه مختلف انجام شده است. در تمامی آزمایش‌ها مدل دارای ۴ رفتار حرکتی شامل نوسانی ناپایا، نوسانی پایا، دورانی ناپایا و دورانی پایا می‌باشد. شکل (۴) تغییرات نسبت طولی استوانه با سه بالک به طول ۱۶سانتی‌متر در زاویه حمله یکسان ۸ درجه، سرعت ۱۰ متر برثانیه را نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی محدوده سرعت جریان را نشان می‌دهد و محور عمودی بیانگر زاویه قرار گرفتن مدل بر اساس شکل (۲) می‌باشد. دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی استفاده شده در این تحقیق دارای یک چرخ دنده بوده که این چرخ دنده قابلیت تغییر زاویه بالک را دارد. این چرخ دنده دارای ۴۵ دندانه بوده که امکان جابه‌جایی صفحه به میزان ۸ درجه در هر دندانه را فراهم می‌آورد. وقتی که مدل دوران می‌کند و یک دور کامل می‌زند، مجموع دندانه‌ها ۳۶۰ درجه را نشان می‌دهد. وقتی که مدل در مسیر جریان قرار می‌گیرد، با توجه به میزان سرعت جریان و ابعاد بالک‌هایی که به مدل متصل می‌باشد، مدل رفتار حرکتی متفاوتی از خود نشان می‌دهد. چنانچه که از شکل پیداست، در زاویه حمله ۸ درجه در نسبت طولی ۱، جسم یک نوسان حول ۶۰ درجه انجام می‌دهد و سپس میرا می‌شود؛ اما به تدریج وقتی که طول صفحه افزایش پیدا کرده در نسبت طولی ۲، ما شاهد دو نوسان حول زاویه ۶۰ درجه هستیم. شکل (۵) تغییرات نسبت طولی استوانه به طول ۲۴ سانتی‌متر در زاویه حمله یکسان ۸ درجه، سرعت ۱۰ متر برثانیه را نشان می‌دهد. وقتی که طول جسم تغییر پیدا می‌کند و از ۱۶ سانتی‌متر به ۲۴ سانتی‌متر افزایش می‌یابد در زاویه حمله یکسان (۸ درجه و سرعت ۱۰ متر بر ثانیه) از جسم همان تغییرات مشاهده می‌شود؛ با این تفاوت که در استوانه به طول ۲۴ سانتی‌متر، در نسبت طولی ۲، دامنه نوسان بیشتر بوده و جسم بعد از نوسان وارد فاز دوران می‌شود؛ اما در استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر بعد از یک نوسان، جسم میرا می‌شود. در شکل (۶) با افزایش زاویه حمله نسبت به شکل (۴) در سرعت‌های یکسان ۱۰ متر برثانیه و در نسبت طولی ۱ تغییراتی حرکتی نداشته اما در نسبت طولی ۲ با افزایش سطح مقطع جریان، جسم تنها ۲ نوسان انجام می‌دهد. شکل (۷)، تغییرات نسبت طولی دو استوانه در L/R=1 زاویه حمله یکسان ۸ درجه، سرعت یکسان ۱۵ متر برثانیه را نشان می‌دهد. با افزایش طول جسم، در نتیجه بالک‌های متصل به آن نیز افزایش یافته، و فاز حرکتی آن نسبت به استوانه ۱۶ سانتی‌متر دارای نوسان بیشتری است که با افزایش نسبت طولی، جسم وارد دوران می‌شود که به خوبی در شکل (۸) نشان داده شده است. با افزایش نسبت طولی، استوانه بزرگ‌تر در شروع حرکت دوران نموده، اما به دلیل پایین بودن سرعت جریان، فاز دورانی جسم نمی‌تواند پایا باشد و شروع به نوسان می‌کند؛ اما فاز حرکتی استوانه کوچک‌تر از ابتدا نوسانی بوده و به‌صورت پایا به حرکت نوسانی خود ادامه می‌دهد. شکل (۹) تغییرات زاویه‌ای جسم نسبت به زمان را برای استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر، در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. همان‌طوری که از این شکل پیداست، در اعداد رینولدز پایین، به دلیل آن‌که سرعت کم است جریان نیروی کمی به بالک‌ها وارد می‌کند و رفتار حرکتی مدل یک یا چند نوسان نموده و میرا می‌شود؛ اما با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان ورودی و همچنین نیروی وارد شده بر بالک‌ها نیز افزایش یافته و رفتار حرکتی مدل از نوسانی ناپایا به نوسانی پایا تغییر پیدا می‌کند. تا وقتی که جریان ادامه‌دار باشد مدل به‌صورت یکنواخت نوسان می‌کند. به عبارتی می‌توان گفت در یک زاویه حمله با یک بالک و در یک سرعتی که حرکت مدل نوسانی بوده، با افزایش سرعت یا با تغییر زاویه حمله و یا تغییر بالک، این مدل حرکت نوسانی به نوسانی پایا تغییر می‌یابد و دیگر میرایی نخواهد داشت. در شکل (۱۰)

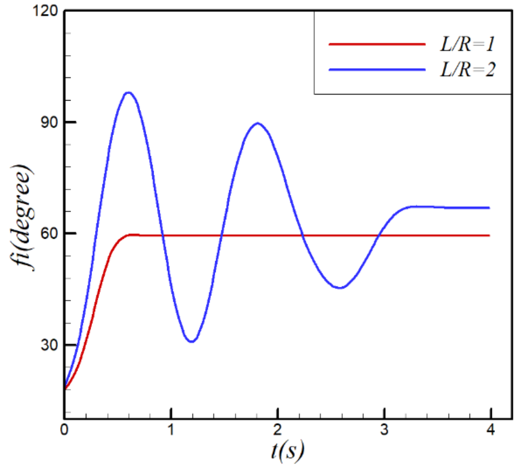
تغییرات نسبت طولی دو استوانه با سه صفحه در L/R=4، زاویه حمله یکسان ۸ درجه و سرعت یکسان ۱۵ متر بر ثانیه نشان داده شده است. با افزایش سطح مقطع صفحات در نسبت طولی ۴، نیرویی که از طرف جریان بر صفحات وارد می‌شود افزایش یافته و موجب شده که هر دو استوانه در زاویه حمله ۸ درجه با سرعت ۱۵ متر برثانیه از ابتدا وارد فاز حرکتی دورانی پایا شوند. شکل (۱۱) نیز تغییرات زاویه جسم نسبت به زمان را برای استوانه‌ای به طول ۲۴ سانتی‌متر با نسبت طولی ۲ در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. در این شکل، دو رژیم حرکتی نوسانی ناپایا در اعداد رینولدز پایین و دورانی پایا در اعداد رینولدز بالا مشاهده می‌شود. با افزایش نسبت طولی (شکل ۱۲)، عدد رینولدز افزایش یافته و رژیم حرکتی جسم نیز تغییر خواهد کرد. در شکل (۱۲) با افزایش طول استوانه و افزایش نسبت طولی، صفحات دارای بیشترین سطح مقطع است و در تمامی اعداد رینولدز داده شده، رژیم حرکتی جسم دورانی پایا می‌باشد. تغییرات سرعت زاویه‌ای نسبت به زمان برای مدل استوانه‌ای به طول ۱۶ سانتی‌متر به همراه سه صفحه در نسبت طولی ۲، در زوایای حمله اولیه مختلف مدل در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در زوایای حمله اولیه ۰ و ۸ درجه، حرکت جسم به‌صورت نوسانی پایا است؛ لذا در این دو زاویه حمله، نوسانات حول سرعت زاویه‌ای متوسط صورت می‌گیرد. در زوایای حمله بالاتر با کاهش نیروی وارد بر صفحات، رژیم حرکتی جسم به‌صورت نوسانی ناپایا بوده و با میرایی حول زاویه ۶۰ درجه همراه است.



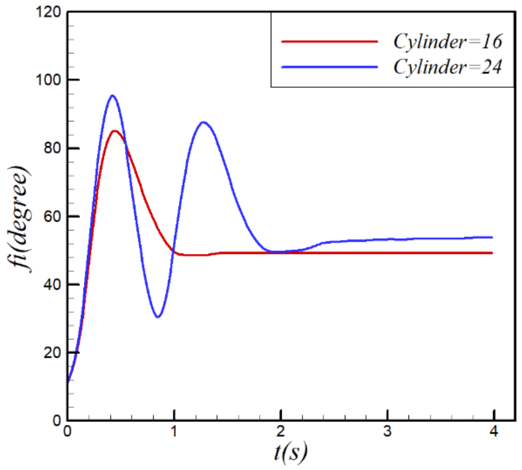
شکل ۴ تغییرات نسبت طولی استوانه با سه صفحه به طول ۱۶ سانتی‌متر در زاویه حمله ۸ درجه، سرعت ۱۰ متر بر ثانیه



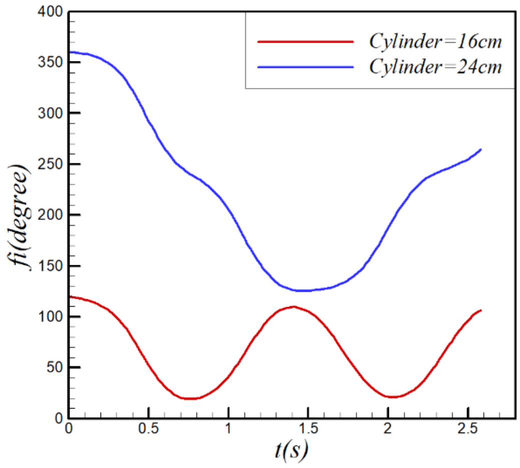
شکل ۵ تغییرات نسبت طولی استوانه به طول ۲۴ سانتی‌متر در زاویه حمله یکسان ۸ درجه، سرعت ۱۰ متر برثانیه



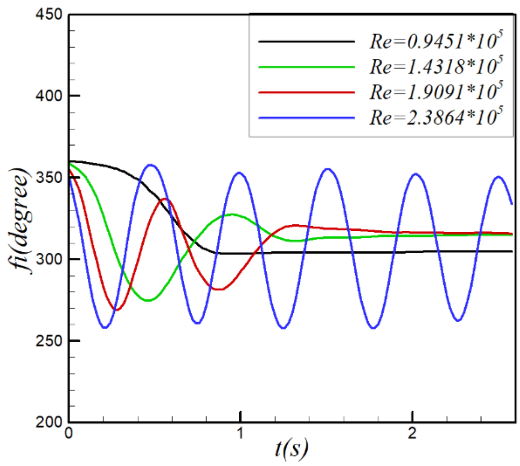
شکل ۶ تغییرات نسبت طولی استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر در زاویه حمله یکسان ۱۶ درجه، سرعت ۱۰ متر برثانیه



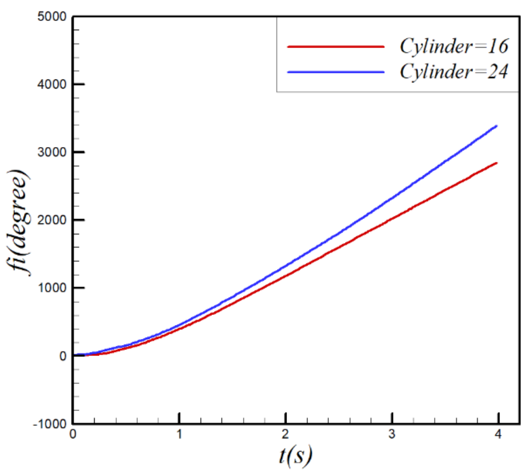
شکل ۷ تغییرات نسبت طولی دو استوانه در نسبت طولی ۱ زاویه حمله ۸ درجه، سرعت یکسان ۱۵ متر بر ثانیه



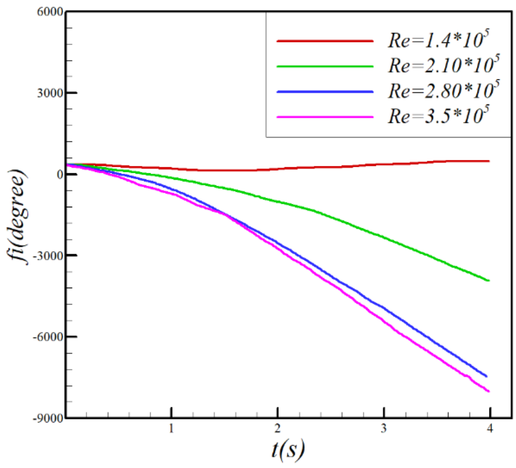
شکل ۸ تغییرات نسبت طولی دو استوانه با سه صفحه در نسبت طولی ۲، زاویه حمله صفر، سرعت ۱۰ متر بر ثانیه



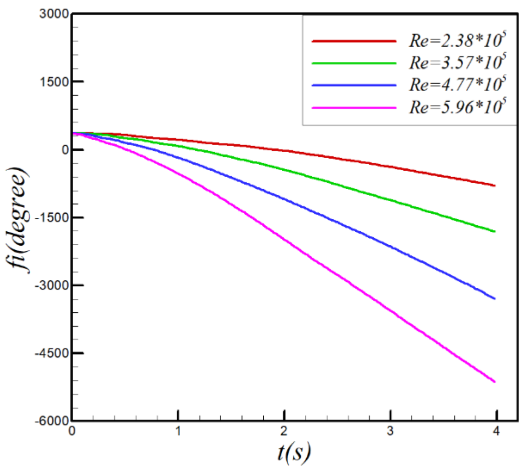
شکل ۹ تغییرات زاویه جسم به زمان برای استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر و نسبت طولی ۱ و زاویه حمله صفر درجه در اعداد رینولدز مختلف



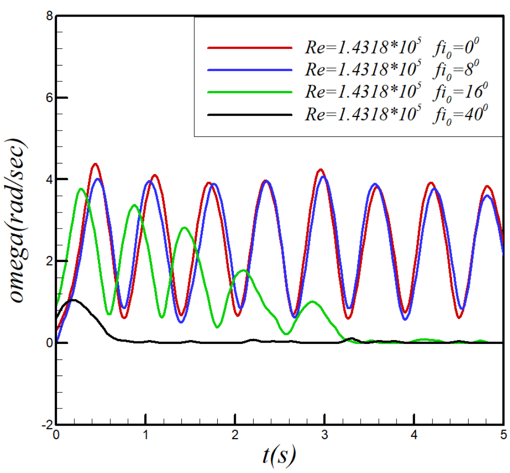
شکل ۱۰ تغییرات نسبت طولی دو استوانه با سه صفحه در نسبت طولی ۴، زاویه حمله ۸ درجه، سرعت ۱۵ متر بر ثانیه



شکل ۱۱ تغییرات زاویه جسم به زمان برای استوانه به طول ۲۴ سانتی‌متر و نسبت طولی ۲ و زاویه حمله صفر درجه در اعداد رینولدز مختلف

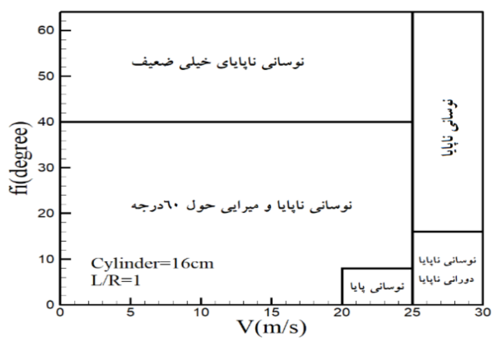


شکل ۱۲ تغییرات زاویه جسم به زمان برای استوانه ۲۴ سانتی‌متر و نسبت طولی ۴ و زاویه حمله صفر درجه در اعداد رینولدز مختلف

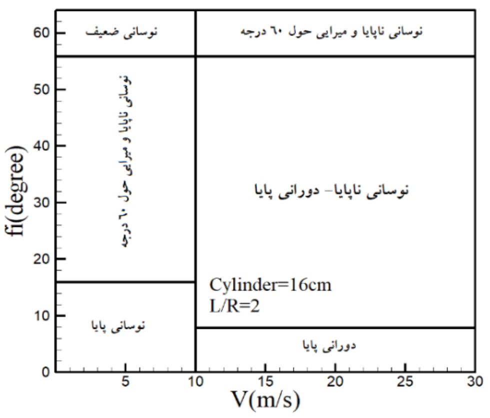


شکل ۱۳ تغییرات سرعت زاویه‌ای جسم نسبت به زمان استوانه ۱۶ سانتی‌متر و نسبت طولی ۲ در زوایای حمله مختلف

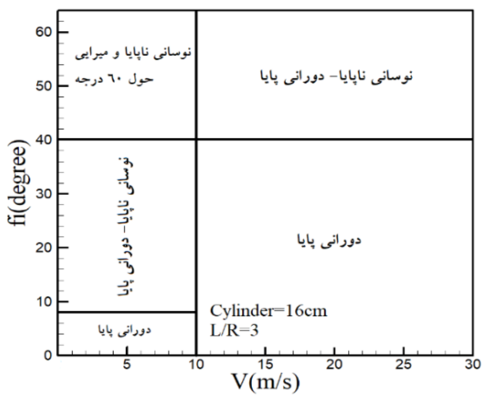
در شکل (۱۴) الگوی رفتار دینامیکی استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر با نسبت طولی ۱ نشان داده شده است. در این نسبت طولی در سرعت‌های ۰ تا ۲۰ متر برثانیه و زوایای حمله ۰ تا ۴۰ درجه رفتار حرکتی مدل از نوع نوسانی بوده و حول ۶۰ درجه میرا می‌شود. در زوایای حمله ۴۰ تا ۶۰ درجه مدل دارای نوسانات ضعیف است. در سرعت‌های ۲۵ و ۳۰ متر بر ثانیه و زوایای حمله ۰ تا ۱۶ درجه حرکت مدل، نوسانی همراه با دوران می‌باشد. الگوی رفتار دینامیکی در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نشان می‌دهد که با افزایش طول بالک‌ها نسبت طولی نیز افزایش می‌یابد و طول مشخصه مدل که در معرض جریان قرار می‌گیرد نیز زیاد می‌شود و باعث می‌شود جریان نیروی بیشتری بر جسم وارد نماید؛ به‌طوری که رفتار حرکتی مدل در زوایای حمله اولیه و در سرعت‌های ۱۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه دورانی است. در شکل (۱۷) از یک بالک به عرض ۲۰ سانتی‌متر (نسبت طولی ۴) استفاده شده است. در این نسبت طولی در تمامی رژیم‌های جریان و زوایای حمله ۰ تا ۵۶ درجه رفتار حرکتی مدل از نوع دورانی بوده و تا زمانی که جریان پایا باشد رفتار مدل نیز دورانی پایا خواهد بود؛ اما در محدوده زاویه تعادلی ۶۰ درجه جسم پس از دریافت سیگنال رهایش چند نوسان انجام نموده و سپس وارد فاز دورانی خواهد شد. قابل ذکر است که در استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر با نسبت‌های طولی ۱ تا ۴، اگر سرعت ثابت فرض شود بیشترین فاز حرکتی مدل مربوط به زوایای حمله اولیه خصوصا صفر درجه است. وقتی مدل در زاویه حمله صفر درجه (بالک ۱ در زاویه صفر درجه با جریان باشد) قرار دارد به دلیل این‌که جسم متقارن است، جریان به‌طور یک‌نواخت به هر دو سطح مقطع دیگری برخورد نموده و به عبارتی می‌توان گفت بیشترین سطح مقطع جسم یا همان طول مشخص مدل در معرض جریان قرار می‌گیرد و نیروی وارد از طرف مدل با فرض ثابت بودن سرعت، بیشترین مقدار است.



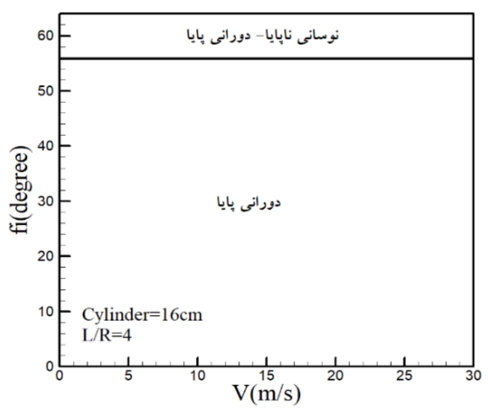
شکل ۱۴ الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۱ برای استوانه ۱۶ سانتی‌متر



شکل ۱۵ الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۲ برای استوانه ۱۶سانتی‌متر



شکل ۱۶ الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۳ برای استوانه ۱۶سانتی‌متر

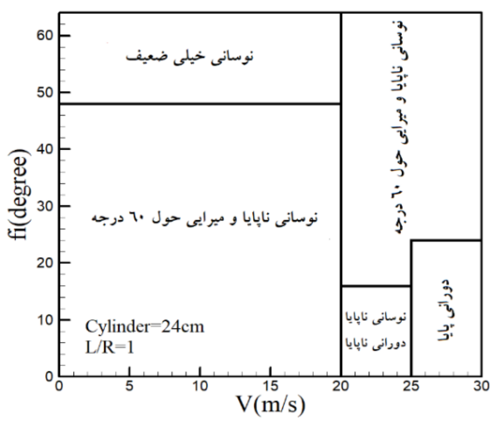


شکل ۱۷ الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۴ برای استوانه ۱۶سانتی‌متر

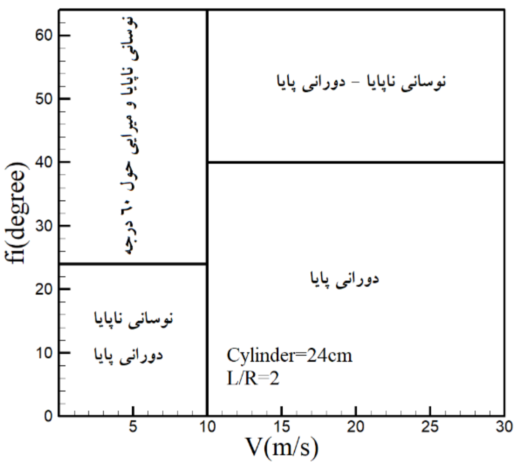
شکل (۱۸) الگوی رفتار دینامیکی استوانه به طول ۲۴ سانتی‌متر با نسبت طولی ۱ را نشان می‌دهد. تفاوتی که این شکل نسبت به شکل (۱۴) دارد طول بالک‌های استفاده شده در مدل است. با این‌که نسبت طولی در هر دو شکل (۱) می‌باشد

اما طول استوانه و همچنین طول بالک‌ها در شکل (۱۸) افزایش یافته است. با افزایش سطح مقطع بالک نیروی وارد شده از سوی جریان به مدل نیز افزایش یافته و رفتار حرکتی مدل نیز تغییر می‌کند. در شکل (۱۴) مدل در هیچ یک از سرعت‌های جریان وارد فاز دورانی نمی‌شود اما در شکل (۱۸) در سرعت‌های ۲۵ تا ۳۰ متر بر ثانیه و زاویه حمله ۰ تا ۲۴ درجه فاز حرکتی مدل از نوع دورانی است. در شکل (۱۹) در سرعت‌های ۱۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه و همچنین در زوایای حمله ۰ تا ۴۰ درجه مدل دارای رفتار حرکتی دورانی پایا است اما در همین نسبت طولی در استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر شکل (۱۵) تنها در زوایای حمله ۰ و ۸ درجه، رفتار حرکتی مدل دورانی است که علت آن افزایش طول استوانه و افزایش سطح مقطع بالک می‌باشد. در شکل (۲۰) تغییرات رفتار حرکتی مدل نسبت به شکل (۱۶) در استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر به خوبی قابل مشاهده است. شکل (۲۱) الگوی رفتار دینامیکی در نسبت طولی ۴ برای استوانه ۲۴سانتی‌متر را نشان می‌دهد که در سرعت‌های تا ۳۰ متر بر ثانیه و زوایای حمله ۰ تا ۵۶ درجه جسم تنها یک فاز حرکتی داشته که آن نیز دورانی پایا است.

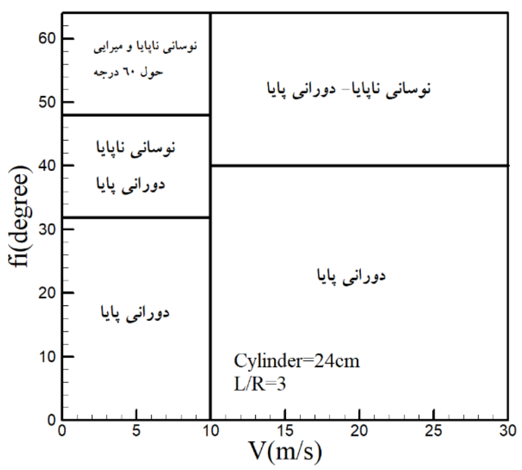
شکل (۲۲)، تغییرات سرعت زاویه‌ای جسم نسبت به زمان را برای استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر و نسبت طولی ۴ و در زاویه حمله اولیه صفر درجه برای اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. در این حالت، تغییرات سرعت زاویه‌ای برای رژیم حرکتی دورانی پایا به‌صورت نوسانی حول سرعت زاویه‌ای متوسط ارائه شده است. پس از رها شدن مدل، سرعت زاویه‌ای متوسط با زمان افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، مقدار متوسط سرعت زاویه‌ای افزایش یافته و دامنه نوسانات کاهش پیدا می‌کند.



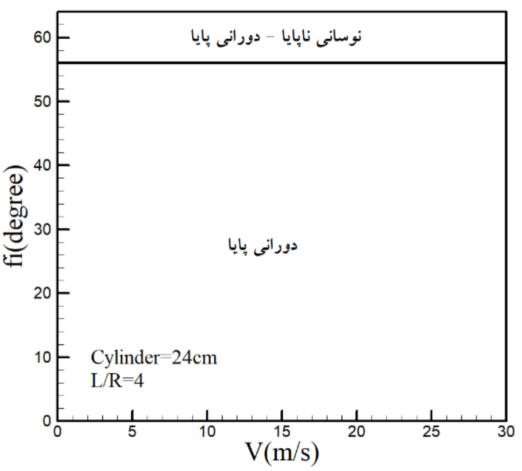
شکل ۱۸ الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۱ برای استوانه ۲۴سانتی‌متر



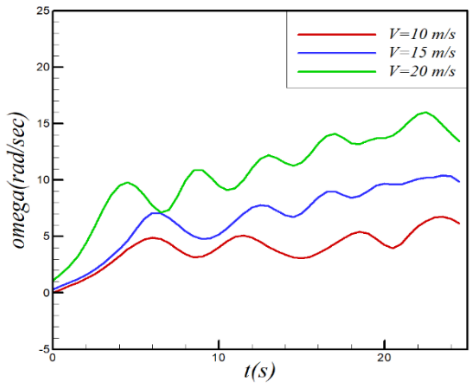
شکل ۱۹ الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۲ برای استوانه ۲۴سانتی‌متر



شکل ۲۰ الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۳ برای استوانه۲۴سانتی‌متر



شکل ۲۱ الگوی رفتار دینامیکی برای نسبت طولی ۴ برای استوانه ۲۴سانتی‌متر



شکل ۲۲ تغییرات سرعت زاویه‌ای جسم نسبت به زمان برای استوانه ۱۶ سانتی‌متری و نسبت طولی ۴ و در زاویه حمله صفر درجه در اعداد رینولدز مختلف

فرکانس کاهیده κ از پارامترهای مهم ناپایایی جریان می‌باشد که به‌صورت رابطه $\kappa = \frac{\omega D}{۲V}$ تعریف شده است. در این رابطه، ω بیانگر سرعت زاویه‌ای، D طول مشخص مدل و V سرعت جریان آزاد جسم است. در جدول‌های (۱) تا (۴) اعداد رینولدز و اشتروهال و سرعت زاویه‌ای متوسط و فرکانس کاهیده در شرایط مختلف ارائه شده است. در جدول‌های (۲) و (۴)، این مقادیر برای استوانه به طول ۲۴ سانتی‌متر با نسبت‌های طولی ۲ و ۴ در سه زاویه حمله ۰، ۸ و ۴۰ محاسبه شده است و همچنین در جدول‌های (۱) و (۳)، این مقادیر برای استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر در نسبت طولی ۲ و ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱ عدد رینولدز، عدد اشتروهال، سرعت زاویه‌ای متوسط وفرکانس کاهیده برای استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر با و نسبت طولی ۲

V (m/s)	ω (rad/s)	κ	Re (*10^5)	St
۱۰	۲ / ۴۶۷۳	۰/۰۲۷۷۵	۱/ ۴۳۱۸	۰/۰۰۸۸۳۸
۱۵	۶ / ۷۷۶۴	۰/۰۵۰۸۲	۲/۱۴۷۷	۰/۰۱۶۱۸
۲۰	۱۶ / ۳۴۱۳	۰/۰۹۱۹	۲/۸۶۳۶	۰/۰۲۹۲۷
۲۵	۲۳ / ۱۲۶۵	۰/۱۰۴۰	۳/۵۷۹۶	۰/۰۳۳۱۴
۳۰	۳۳ / ۰۰۹۲	۰/۱۲۳۷	۴/۲۹۵۵	۰/۰۳۹۴۲

جدول ۲ عدد رینولدز، عدد اشتروهال ، سرعت زاویه‌ای متوسط و فرکانس کاهیده برای استوانه به طول ۲۴ سانتی‌متر با و نسبت طولی ۲

V (m/s)	ω (rad/s)	κ	Re (*10^5)	St
۱۰	۲/۶۰۸۲	۰/۰۲۹۳۴	۱ / ۴۳۱۸	۰ / ۰۰۹۳۴۴
۱۵	۱۸/۷۹۸۹	۰/۱۴۰۹۹	۲ / ۱۴۷۷	۰ / ۰۴۴۹۰
۲۰	۳۴/۴۶۶۸	۰/۱۹۳۸۷	۲ / ۸۶۳۶	۰ / ۰۶۱۷۴
۲۵	۳۶/۵۹۸۵	۰/۱۶۴۶۰	۳ / ۵۷۹۶	۰ / ۰۵۲۴۴

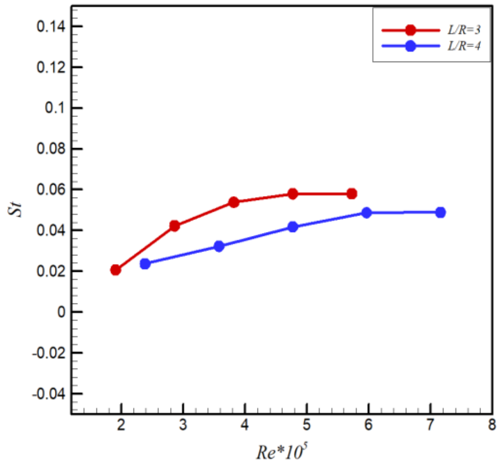
جدول ۳ عدد رینولدز، عدد اشتروهال، سرعت زاویه‌ای متوسط و فرکانس کاهیده، استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر با سه صفحه و نسبت طولی ۴

V (m/s)	ω (rad/s)	κ	Re (*10^5)	St
۱۰	۴ / ۳۴۷۱	۰/۰۶۵۲۰	۲ / ۳۸۶۴	۰/۰۲۳۷۲
۱۵	۱۴ / ۸۲۸۳	۰/۱۴۸۲۰	۳ / ۵۷۹۶	۰/۰۳۲۰۱
۲۰	۲۲ / ۶۰۸۱	۰/۱۶۹۵۱	۴ / ۷۷۲۸	۰/۰۴۱۴۰
۲۵	۳۱ / ۳۶۹۷	۰/۱۸۸۲۰	۵ / ۹۶۶۰	۰/۰۵۲۳۶
۳۰	۳۹ / ۶۱۷۰	۰/۱۹۸۹۰	۷ / ۱۵۹۲	۰/۰۴۸۹۰

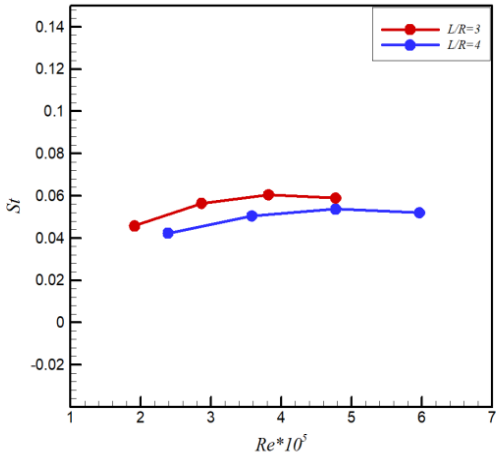
جدول ۴ عدد رینولدز، عدد اشتروهال ، سرعت زاویه‌ای متوسط و فرکانس کاهیده، استوانه به طول۲۴ سانتی‌متر با سه صفحه و نسبت طولی ۴

V (m/s)	ω (rad/s)	κ	Re (*10^5)	St
۱۰	۹ / ۵۸۳۰	۰/۱۴۳۷	۲ / ۳۸۶۴	۰/۰۴۲۳۶
۱۵	۱۹ / ۸۴۴۶	۰/۱۹۸۴	۳ / ۵۷۹۶	۰/۰۵۶۵۹
۲۰	۲۶ / ۴۸۷۸	۰/۱۹۸۶	۴ / ۷۷۲۸	۰/۰۶۱۱۲
۲۵	۳۵ / ۶۴۵۶	۰/۲۲۵۸	۵ / ۹۶۶۰	۰/۰۵۲۰۱

شکل (۲۳)، تغییرات عدد اشتروهال نسبت به عدد رینولدز را برای استوانه‌ای به طول ۱۶ سانتی‌متر در دو نسبت طولی ۳ و ۴ نشان می‌دهد. مشابه با نتایج بلوینز که نشان داد برای استوانه چرخان تغییرات عدد اشتروهال نسبت به عدد رینولدز، دارای مقدار ثابت ۰/۲ است، برای استوانه به همراه صفحات نیز این تغییرات نسبت به عدد رینولدز مقدار ثابتی را نشان می‌دهد. برای نسبت طولی ۳ مقدار متوسط عدد اشتروهال برابر با ۰/۰۴۸۱ و برای نسبت طولی ۴، این مقدار معادل با ۰/۰۳۹۶ است. با افزایش نسبت طولی از ۳ به ۴ مقدار متوسط عدد اشتروهال کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت طولی، نوسانات جریان نیز کاهش می‌یابد. این نکته در شکل (۲۴) برای استوانه‌ای به طول ۲۴ سانتی‌متر در نسبت‌های طولی ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌طوری که از این شکل نیز پیداست، با افزایش عدد رینولدز، عدد اشتروهال نیز افزایش یافته و در اعداد رینولدز بالا به مقدار ثابتی می‌رسد. متوسط عدد اشتروهال برای نسبت طولی ۳ معادل با ۰/۰۵۷۷ و برای نسبت طولی ۴ مقدار متوسط عدد اشتروهال برابر با ۰/۰۵۳۰ است.



شکل ۲۳ تغییرات عدد اشتروهال نسبت به عدد رینولدز برای استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر



شکل ۲۴ تغییرات عدد اشتروهال نسبت به عدد رینولدز برای استوانه به طول ۲۴ سانتی‌متر

عدم قطعیت جواب‌ها

در یک آزمایش منابع خطاهای مختلفی وجود دارد که تقریب، تخمین و میزان این خطا جهت اطمینان به نتایج حاصل از آزمایش، بخشی از آزمایش به حساب می‌آید. هدف نهایی از آنالیز عدم قطعیت، پیدا کردن تقریبی حداکثر پارامترهای خطای تصادفی (Precision Error) و خطای بایاس (Systematic or Fixed Bias Error) (خطای وسایل اندازه‌گیری) سیستماتیک است. با ترکیب دو پارامتر ذکر شده می‌توان خطای نهایی آزمایش و میزان عدم قطعیت نتایج آزمایش را تعیین نمود. در خصوص خطای بایاس، دستگاه ساخته شده از قسمت‌های متنوعی برخوردار است که هر یک از این بخش‌ها خطایی را وارد سیستم و نتایج حاصل از آزمایش می‌نماید. اولین قسمت مورد بررسی، صفحات تخت بوده که از جنس آلومینیوم می‌باشند. این صفحات با دستگاه برش صنعتی (کاتر) بریده شده‌اند. دقت این دستگاه بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

در نتیجه درصد خطای برش به‌صورت روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شود:

$$\%E_L = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \qquad (۳)$$

$$\%E_W = \frac{\Delta W}{W} \times 100 \qquad (۴)$$

که در آن L طول و W عرض صفحه می‌باشد. چرخ‌دنده ۴۵ دندانه مورد استفاده در آزمایش که فاصله مابین دندانه‌های آن ۸ درجه می‌باشد نیز دارای یک دقت معینی بر حسب تکنولوژی طراحی و ساخت آن می‌باشد. قطعه دیگر موتور شفت انکودر بوده که تأثیر زیادی بر روی نتایج دارد. این قطعه دارای وضوح (Resolution) ۱۰۲۴ می‌باشد. بدین معنی که یک دوران کامل (۳۶۰ درجه) را به ۱۰۲۴ قسمت تقسیم کرده و جابه‌جایی شفت به ازای ۰/۳۵ درجه می‌باشد. لذا دقت موتور انکودر و در نتیجه عدم قطعیت زاویه اندازه‌گیری شده برابر است با:

$$\phi = (1.00 \pm 0.35)\text{deg}$$

زمان و میزان داده‌برداری دستگاه نیز از جمله مسائل مهم در بررسی دقت و خطای آزمایش می‌باشد. در هر ثانیه تعداد ۲۵۰ عدد نمونه‌برداری صورت می‌گیرد، لذا به ازای هر ۰/۰۰۴ ثانیه یک نمونه توسط دستگاه گرفته می‌شود. دقت زمان نمونه‌برداری و عدم قطعیت زمان به‌صورت رابطه زیر است:

$$t = (0.004 \pm 0.001)\text{sec}$$

بیشترین خطای ممکن در زاویه حمله ۸ درجه است. هر چه زاویه حمله بالک افزایش یابد، دقت آن افزایش یافته و خطای وارده کاهش می‌یابد. دقت و درصد خطای این زاویه به‌صورت ذیل می‌باشد:

$$\phi = (8.00 \pm 0.35)\text{deg}$$

$$\%E_\phi = \frac{0.35}{8.00} \times 100 = \%4.3$$

خطاهای فوق در بدترین حالت در نظر گرفته شده است،

لذا در شرایط دیگر نیز مقدار خطا باید محاسبه شود تا میانگین خطای وارده بر تمام آزمایش‌ها محاسبه شود. بدترین حالت موجود در صفحات مورد آزمایش از نظر حداکثر خطا مربوط به کوچک‌ترین صفحه با ابعاد ۱۶×۵ سانتی‌متر است. لذا دقت و خطای اندازه‌گیری آن به‌صورت زیر است:

$$L = (16 \pm 0.1)\text{cm}$$

$$W = (5.0 \pm 0.1)\text{cm}$$

$$\%E_L = \frac{0.1}{16.0} \times 100 = \%0.625$$

$$\%E_W = \frac{0.1}{5.0} \times 100 = \%2$$

همان‌طور که دیده می‌شود حداکثر خطای موجود در اندازه‌گیری و برش صفحات در بدترین شرایط ۲ درصد است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار دینامیکی یک مدل استوانه با سه بالک متصل به آن به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در نسبت طولی ثابت و عدد رینولدز ثابت، وقوع رژیم حرکت دورانی پایا در زوایای حمله اولیه نزدیک به صفر بوده و با افزایش زاویه حمله اولیه جسم، نوع حرکت مدل به‌صورت نوسانی پایا خواهد بود. همچنین در اعداد رینولدز پایین و نسبت‌های طولی کم، تمامی حرکات مدل به‌صورت نوسانی با دامنه نوسانات کاهیده حول زاویه تعادلی خاص می‌باشد که این زاویه برای استوانه به همراه سه بالک در حدود ۶۰ درجه است. در صورت عدم وجود اصطکاک در سیستم، این نوسان میرا نشده و با زمان ادامه می‌یابد. ولی به علت وجود اصطکاک، این نوسان میرا و در نهایت، صفحه در زاویه ۶۰ درجه متوقف می‌شود. با افزایش عدد رینولدز، مشاهده می‌شود که زاویه حمله اولیه وقوع رژیم حرکتی نوسانی افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در نسبت طولی ۴، نوع حرکت در تمامی زوایای حمله اولیه به‌صورت دورانی پایا می‌باشد که این امر به سبب افزایش مساحت صفحه عمود بر جریان است و باعث اعمال نیروهای بزرگ‌تری به صفحات شده و منجر به رژیم حرکتی دورانی می‌شود. چون مدل با سرعت زاویه‌ای اولیه صفر درجه در جریان رها می‌شود، بنابراین سرعت زاویه‌ای مدل به‌صورت نوسانی حول زاویه صفر درجه می‌باشد. در رژیم حرکت دورانی، سرعت زاویه‌ای به‌صورت نوسانی است که با گذشت زمان افزایش یافته و دامنه نوسان کاهش پیدا می‌کند که این امر به سبب افزایش مقدار سرعت‌های اغتشاشی در جریان می‌باشد. عدد بی‌بعد اشتروهال، بیانگر نوسانات جریان است. عدد اشتروهال برای حالت استوانه به طول ۱۶ سانتی‌متر در محدوده ۰/۰۰۰۹۳۷ تا ۰/۰۵۹۹ است و برای استوانه به طول ۲۴ سانتی‌متر در محدوده ۰/۰۰۱۱۳ تا ۰/۰۶۳۲ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه حمله اولیه مدل، تغییرات عدد اشتروهال نسبت به عدد رینولدز کاهش پیدا می‌کند و با افزایش عدد رینولدز، عدد اشتروهال دارای مقدار ثابتی می‌شود. در ضمن با افزایش طول استوانه و افزایش سطح مقطع صفحات، متوسط عدد اشتروهال نیز افزایش پیدا می‌کند. ساختار هندسی جسم با وجود صفحات تخت و همچنین حرکت نوسانی و یا دورانی آن، جریانی مغشوش در شرایط مختلف ایجاد می‌کند؛ یعنی در سرعت‌های مورد آزمایش، جریان حول جسم مغشوش می‌باشد. با افزایش عدد رینولدز در یک نسبت طولی ثابت، رژیم حرکتی رفته‌رفته از نوسانی ناپایا به نوسانی پایا، دورانی ناپایا و دورانی پایا تغییر می‌کند. همچنین با افزایش نسبت طولی در یک عدد رینولدز ثابت، رژیم حرکتی نیز از سطح میرا به نوسانی ناپایا، نوسانی پایا، دورانی ناپایا و دورانی پایا تغییر می‌یابد.

واژه نامه

نوسانات آزاد	Free Oscillations
نسبت طولی	Length ratio
نوسان ناپایا	Unsteady oscillation
دوران ناپایا	Unsteady rotation
نوسان پایا	Steady oscillation
دوران پایا	Steady rotation
سرعت جریان آزاد	Free stream velocity
دامنه	Amplitude

نمادها

$\frac{L}{R}$	نسبت طولی(cm)
L	طول صفحه (cm)
W	عرض صفحه (cm)

E	خطا	ω	سرعت زاویه‌ای جسم (Rad/sec)
t	زمان (sec)	κ	فرکانس کاهیده
S_t	عدد اشتروهال		
R_e	عدد رینولدز		
T	دوره تناوب		
V_∞	سرعت جریان آزاد (m/sec)		

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] C. Feng, "The measurement of vortex induced effects in flow past stationary and oscillating circular and d-section cylinders, M.S thesis," The University of British Columbia, Canada, 1968.

[2] X. Amandolese, and P. Hemon, "Vortex-induced vibration of a square cylinder in wind tunnel," *Journal of Comptes Rendus Mecanique,* vol. 338, no. 1, pp. 12-17. 2010,

[3] S. Umemura, T. Yamaguchi, and K. Shiraki, "On the vibration of Cylinders caused by Karman Vortex," *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineering*, vol.14, no.75, pp. 929-936, 1971.

[4] T. Sarpkaya, "Vortex-induced vibrations, A selective review," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 46, no. 2, pp. 241-258. 1979.

[5] T. Sarpkaya, "A critical review of the intrinsic nature of vortex induced vibration," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 19, no. 4, pp. 389-447. 2004.

[6] R. H. Scanlan, and R. Rosenbaum, "Introduction to the study of Aircraft Vibration and Flutter," *Mineola: Dover*, 1968.

[7] Z. Lin, " On the vortex shedding around a circular cylinder modulated by ambient density stratification," *Ocean Engineering*, vol. 266, 15 December 2022.

[8] B. Xu, H. Wang, Y. Deng, X. Shen, L. Geng, K. Liu, and D. Zhang, " Nonlinear vortex dynamic analysis of flow-induced vibration of a flexible splitter plate attached to a square cylinder," *Ocean Engineering*, vol. 264, 15 November 2022

[9] Y. Song, Z. Liu, A. Rønnquist, P. Nåvik, and Z. Liu "Contact wire irregularity stochastics and effect on high-speed railway pantograph–catenary interactions," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no.10, pp.8196–8206. 2020

[10] Y. Song, Z. Wang, Z. Liu, and R. Wang, "A spatial coupling model to study dynamic performance of pantograph-catenary with vehicle-track excitation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 151, 107336. 2021

[11] J. Wang, L. Geng, L. Ding, H. Zhu, and D. Yurchenko, "The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations," *Applied Energy*, vol. 267, 114902. 2020

[12] J. Wang, Z. Su, H. Li, L. Ding, H. Zhu, and O. Gaidai, "Imposing a wake effect to improve clean marine energy harvesting by flow-induced vibrations," *Ocean Engineering*, vol. 208, p.107455. 2020

[13] M. Jafari, F. Hou, and A. Abdelkefi, "Wind-induced vibration of structural cables," *Nonlinear Dynamics*, vol. 100, no.1, pp. 351–421, 2020.

[14] F. Xu, H. Yu, M. Zhang, and Y. Han, “Experimental study on aerodynamic characteristics of a large-diameter ice-accreted cylinder without icicles,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 208, p.104453, 2021.

[15] Y. Bao, Y. Lin, W. Chen, C. Kyu Rheem, and X. Li, “Numerical investigation of wake and flow-induced vibrations of a rotating cylinder in flow,” *Ocean Engineering*, vol. 262, 15 October 2022.

[16] S. Hong , and G. Son, “Numerical simulation of cavitating flows around an oscillating circular cylinder,” *Ocean Engineering*, vol. 226, 15 April 2021.

[17] U. Ali, M.D. Islam, and I. Janajreh, “Flow over rotationally oscillating heated circular cylinder at low Reynolds number,” *Ocean Engineering*, vol. 265, 1 December 2022.

[18] N. Jauvtis, and C.H.K. Williamson, “Vortex-induced vibration of a cylinder with two degrees of freedom,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 17, pp.1035–1042, 2003.

[19] F.L. Pontaa, and H. Arefb, “Numerical experiments on vortex shedding from an oscillating cylinder,” *Journal of Fluids and Structures Journal of Fluids and Structures*, vol. 22, no. 3 pp. 327–344, 2006.